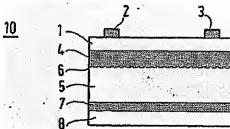


**Publication number:** DE1062044  
**Publication date:** 2002-06-27  
**Inventor:** AMBACHER OLIVER (DE); MUELLER GERHARD (DE);  
 NEUBERGER RALPH (DE); STUTZMANN MARTIN  
 (DE)  
**Applicant:** EADS DEUTSCHLAND GMBH (DE)  
**Classification:**  
 - **International:** G01N27/414; G01N27/403; (IPC-1: H01L29/778;  
 G01N27/414; H01L29/772  
 - **European:** G01N27/414  
**Application number:** DE20001062044 20001213  
**Priority number(s):** DE20001062044 20001213

[Report a data error here](#)

Ion-sensitive semiconductor sensor comprises a succession of layers (1, 4, 5) in the form of a field effect transistor with a source connection (2) and a drain connection (3) coupled together by the layers. The succession of layers are made from group III nitrides formed as an HEMT structure. Preferred Features: The uppermost layer (1) is structured so that it is in contact with the medium to be measured during measuring. The succession of layers has piezo-electric properties. The uppermost layer (1) is made from gallium nitride, aluminum gallium nitride. The succession of layers is formed on a substrate (6) made from sapphire, silicon carbide or silicon.



Data supplied from the *esp@cenet* database - Worldwide



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 100 62 044 A 1

21 Aktenzeichen: 100 62 044.2  
22 Anmeldetag: 13. 12. 2000  
43 Offenlegungstag: 27. 6. 2002

51 Int. Cl.<sup>7</sup>:  
H 01 L 29/778  
H 01 L 29/772  
G 01 N 27/414

DE 100 62 044 A 1

11 Anmelder:  
EADS Deutschland GmbH, 80995 München, DE

12 Erfinder:  
Ambacher, Oliver, Dr., 85375 Neufahrn, DE; Müller,  
Gerhard, Dr.rer.nat., 85567 Grafing, DE; Neuberger,  
Ralph, Dipl.-Phys., 85764 Oberschleißheim, DE;  
Stutzmann, Martin, 85748 Garching, DE

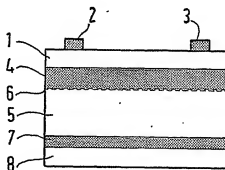
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Ionensensitiver Halbleitersensor

57 Ein Flüssigkeitssensor bzw. Ionensensitiver Halbleitersensor ist aus einer Folge von Schichten (1, 4, 5, 7, 8) aufgebaut, die in Form eines Feldeffekttransistors ausgebildet sind. Ein Source-Anschluss (2) und ein Drain-Anschluss (3) des Feldeffekttransistors sind durch die Schichtfolge miteinander gekoppelt. Die Schichtfolge umfasst eine Heterostruktur aus Gruppe-III-Nitriden, die als HEMT-Struktur bzw. High Electron Mobility Transistor-Struktur ausgebildet ist. Während des Betriebes wird die elektrische Leitfähigkeit der Schichtfolge bestimmt. Die oberste Schicht (1) der Schichtfolge tritt bei der Messung entweder in direkten Kontakt mit dem zu messenden Medium oder über eine weitere funktionale Schicht, die bestimmte Ionen selektiert. Durch piezoelektrische Eigenschaften der Schichtfolge ist eine Fernabfrage mittels Interdigitalstrukturen und Oberflächenwellen möglich.

10



DE 100 62 044 A 1

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen ionensensitiven Halbleitersensor gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 1. Der ionensensitive Halbleitersensor ist insbesondere zur Detektion von Medien mit verschiedener Polarität und mit verschiedenem pH-Wert geeignet.

[0002] Halbleitersensoren, die in der Art von Feldeffekttransistoren aufgebaut sind, werden beispielsweise zur Messung bzw. Detektion in Flüssigkeiten eingesetzt, um bestimmte Anteile oder Eigenschaften der Flüssigkeit bzw. des Mediums zu bestimmen. Beispielsweise ist es für die Wartung von Kraftfahrzeugen oder auch Luftfahrzeugen immer wieder notwendig, den Zustand flüssiger Betriebsmittel, wie z. B. Hydraulik- bzw. Motoröl, zu bestimmen. Bei derartigen Betriebsmitteln, zu denen insbesondere auch Bremsflüssigkeiten gehören, muss in bestimmten Intervallen die Qualität und Funktionsfähigkeit überprüft werden.

[0003] Halbleitersensoren können beispielsweise eingesetzt werden, um Defekte in Zuleitungen oder Flüssigkeitsbehältern zu detektieren sowie durch in-situ-Messungen eine ständige oder intervallgeregelte Überwachung in der Art eines Online-Monitorings oder eines Service-on-Demand der Betriebsmittel zu gewährleisten.

[0004] Im Stand der Technik sind unterschiedliche Arten von Feldeffekttransistoren bekannt, die als Sensoren eingesetzt werden. In dem Artikel "A Generalized Theory of an Elektrolyte-Insulator-Semiconductor Field-Effect Transistor", Clifford D. Fung, et. al., IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-33, No. 1 January 1986, wird beispielsweise ein EISFET als pH-Sensor verwendet, wobei die physikalischen Grundlagen beschrieben werden.

[0005] Der Artikel von P. Bergfeld, The Impact of MOSFET-Based Sensors, Third International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, June 11-14, 1985, beschreibt die Arbeitsweise von MOS-Feldeffekttransistoren unterschiedlicher Bauart zur Messung von physikalischen und chemischen Parametern.

[0006] Fig. 2 zeigt als Beispiel einen bekannten, aus Silizium prozessierten Sensor, der als pH-sensitiver Feldeffekttransistor aufgebaut ist. Es handelt sich dabei um einen ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor). Diese Art von Sensoren detektiert die Säurestärke von Flüssigkeiten über die Wechselwirkung von Protonen der Flüssigkeit mit der auf die Gate-Fläche aufgebracht isolierenden Schicht, wie z. B.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , usw. Derartige Sensoren werden resistiv oder kapazitiv ausgelesen. Auf einem Grundkörper 100 aus p-Silizium ist ein Source-Anschluss 101 und ein Drain-Anschluss 102 aufgebracht. Zwischen dem Source-Anschluss 101 und dem Drain-Anschluss 102 befindet sich eine isolierende Gate-Schicht 103. Jeweils unter den Source- und Drain-Anschlüssen 101 bzw. 102 befinden sich Bereiche 104 von  $n^+$ -Si.

[0007] Die bekannten Sensoren haben jedoch den Nachteil, dass sie keine Wechselwirkungen mit polaren Flüssigkeiten zeigen. Weiterhin sind sie nur bedingt unter rauen Umweltbedingungen einsetzbar, was zu einer aufwendigen Aufbau- und Verbindungstechnik führt. Weiterhin ist mit den bekannten Sensoren keine Fernabfrage möglich. Hinzu kommt noch, dass die Ströme, die das Messsignal tragen, im Falle des bekannten ISFET relativ klein und damit schwierig zu verarbeiten sind. Aufgrund der Materialeigenschaften von Silizium kann der ISFET nur bedingt chemisch wie mechanisch belastet werden, was zu der oben bereits angesprochenen, aufwendigeren Aufbau- und Verbindungstechnik führt.

[0008] Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen ionensensitiven Halbleitersensor zu schaffen,

der Medien bzw. Flüssigkeiten mit verschiedenen Dipolmomenten und verschiedenen pH-Werten detektieren und unterscheiden kann und dabei kostengünstig und robust hergestellt werden kann.

5 [0009] Diese Aufgabe wird gelöst durch den ionensensitiven Halbleitersensor gemäß Patentanspruch 1. Weitere vorteilhafte Merkmale, Aspekte und Details der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen.

10 [0010] Der erfindungsgemäße Ionensensitive Halbleitersensor umfasst eine Folge von Schichten, die in Form eines Feldeffekttransistors ausgebildet sind, wobei jeweils mindestens ein Source-Anschluss und ein Drain-Anschluss des Feldeffekttransistors durch die Schichtfolge miteinander gekoppelt sind, und mit Mitteln zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit der Schichtfolge, wobei die Schichtfolge eine Heterostruktur aus Gruppe-III-Nitriden umfasst, die als HEMT-Struktur (High Electron Mobility Transistor) ausgebildet ist.

20 [0011] Durch die Erfindung ist es möglich, einen polaritäts- und pH-Wert-empfindlichen Flüssigkeitssensor bzw. Gassensor einfach aufzubauen. Insbesondere durch die Wahl der Gruppe-III-Nitride als Sensormaterialien zeichnet er sich auch dadurch aus, dass er Stresswirkungen, insbesondere chemischem und mechanischem Stress, ausgesetzt werden kann. Weiterhin ist eine Signalauswertung mittels Fern- bzw. Funkabfrage leicht zu integrieren. Mit dem Sensor können z. B. Einlagerungen von Wasser in Ölen oder Bremsflüssigkeiten über die Bestimmung der polaren Anteile der Flüssigkeit festgestellt werden. Ebenso ist in den zu messenden Medien die Säurestärke durch Messung des pH-Wertes bestimmbar.

[0012] Vorteilhafterweise ist die oberste Schicht der Schichtfolge bzw. die Gate-Oberfläche derart ausgestaltet, dass sie während der Messung in direktem Kontakt mit dem zu messenden Medium steht. D. h., die Gate-Fläche ist in dieser besonderen Ausgestaltung der Erfindung weder mit einer isolierenden Schicht bedeckt noch metallisiert.

40 [0013] Bevorzugt hat die Schichtfolge oder mindestens eine Schicht der Schichtfolge piezoelektrische Eigenschaften. Durch die piezoelektrischen Eigenschaften des Sensormaterials kann das Messsignal z. B. auch in Form von Oberflächenwellen ausgelesen werden. Dadurch ist es insbesondere möglich, eine Fernabfrage zu realisieren.

50 [0014] Der ionensensitive Halbleitersensor kann z. B. einen oder mehrere Oberflächenwellenfilter zum Auslesen eines Messsignals umfassen. Beispielsweise ist zusätzlich eine Antenne zur Übertragung eines Messsignals an eine Auswertestation und/oder zur drahtlosen Fernabfrage eines Messsignals vorgesehen. Somit kann der Sensor über die Fernabfrage bedient werden, d. h. es sind keinerlei Zuleitungen bzw. Energieversorgungseinheiten direkt am Sensor notwendig. Beispielsweise kann eine Sender-Empfänger-Einheit, die vorteilhafterweise im Megahertz-Bereich arbeitet, in größerer Distanz zum Sensor aufgestellt werden. Der Sensor wird also in dieser Ausgestaltung der Erfindung direkt über Oberflächenwellenfilter ausgelesen.

60 [0015] Vorteilhafterweise ist an einer Grenzfläche zwischen zwei Schichten der Schichtfolge ein zweidimensionales Elektronengas ausgebildet oder ausbildbar. Die Schichtfolge kann z. B. ein oder mehrere GaN-Schichten und ein oder mehrere Al-GaN-Schichten, insbesondere in wechselnder Folge, umfassen. Bevorzugt umfasst die Schichtfolge AlGaIn, sie kann aber auch aus quaternären Verbindungen der Gruppe-III-Nitride hergestellt bzw. herstellbar sein. D. h., die Heterostruktur besteht aus einer abwechselnden Schichtfolge von verschiedenen Gruppe-III-Nitriden. Durch Polarisationseffekte entsteht an einer der Grenzflächen die-

ser Schichten ein zweidimensionales Elektronengas mit hoher Ladungsträgerkonzentration und hoher Ladungsträgerbeweglichkeit. Dadurch sind hohe Kanalströme im Transistor realisierbar, die eine Signalauswertung erleichtern.

[0016] Insgesamt basiert der Sensor auf einer Heterostruktur aus Gruppe-III-Nitriden, die als Feldeffekttransistor mit hoher Ladungsträgerdicke und hoher Ladungsträgerkonzentration (HEMT: High Electron Mobility Transistor) aufgebaut ist. Prinzipiell wird dabei über zwei Kontakte, d. h. Source und Drain, auf der Oberfläche der Struktur eine Spannung angelegt, die zu einem Strom bzw. Kanalstrom zwischen diesen Kontakten führt. Dieser kann durch Potentialveränderungen auf der Oberfläche zwischen den Kontakten, d. h. auf der Gate-Fläche, verändert werden.

[0017] Bevorzugt ist die oberste Schicht der Schichtfolge als GaN-Schicht oder als AlGaIn-Schicht ausgebildet. Vorteilhafterweise dient diese oberste Schicht zur Kontaktierung des zu messenden Mediums. D. h., die bevorzugten Gruppe-III-Nitride des Sensors gemäß dieser Ausführungsform sind abwechselnde Schichten von GaN und AlGaIn, die in zwei verschiedenen Reihenfolgen, entweder N-Face oder Ga-Face, auf einem Substrat aufgewachsen sein können. Das Substrat kann z. B. aus Saphir, SiC oder (111)-Si hergestellt sein. Die Schichten können insbesondere epitaktisch mittels MBE-Verfahren bzw. Molecular Beam Epitaxy oder auch MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) aufgewachsen werden.

[0018] Vorteilhafterweise umfassen die Source- und Drain-Anschlüsse Schichtfolgen von Metallen, bevorzugt aus Ti/Al und/oder Ti/Au. Die Schichtfolge kann z. B. als HEMT-Struktur und/oder als MODFET-Struktur ausgestaltet sein.

[0019] Vorteilhafterweise ist eine weitere Nukleationsschicht vorgesehen, die die Schichtfolge von dem darunter liegenden Substrat trennt.

[0020] Bevorzugt ist eine Dichtung zur Trennung der Kontakte von dem zu messenden Medium vorgesehen. Dadurch sind während der Messung die Kontakte bzw. Source und Drain-Anschlüsse nicht der Flüssigkeit ausgesetzt, sondern durch die Dichtung von der Gate-Fläche getrennt.

[0021] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist der ionensensitive Halbleitersensor monolithisch aufgebaut.

[0022] Der Sensor hat gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform eine auf der Gate-Fläche angeordnete funktionale Schicht zur Unterscheidung verschiedener Ionenarten und/oder zur quantitativen Bestimmung von Ionen. Durch das Aufbringen einer funktionalen Schicht auf die Gate-Fläche ist eine noch bessere Unterscheidung zwischen verschiedenen Ionensorten, sowie eine quantitative Bestimmung der Menge dieser Ionen möglich.

[0023] Diese Schichtsysteme können z. B. aus so genannten Ionentauchern, wie z. B. Ceolithe, gefertigt sein, die für bestimmte Ionen selektiv durchlässig sind. Diese Ionen können beispielsweise Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> usw. sein. In diesem Fall treten nur die durchgelassenen Ionen auf die Gate-Fläche bzw. GaN-Fläche und lösen dort den Sensoreffekt aus.

[0024] Zur verbesserten Messung der Leitfähigkeit oder der pH-Werte von Flüssigkeiten kann beispielsweise eine funktionelle Schicht aus einer leitenden Keramik auf der Gate-Fläche aufgebracht sein. Eine derartige leitende Keramik kann z. B. ein Protonenleiter sein, wie er beispielsweise unter dem Namen ORMOCER® bekannt ist. D. h., es ist möglich, eine funktionale Schicht aufzubringen, die für ionisierte Wasserstoffatome selektiv ist.

[0025] Nachfolgend wird die Erfindung beispielhaft beschrieben. Es zeigen:

[0026] Fig. 1a einen Schnitt durch einen Halbleitersensor

gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung in schematischer Darstellung, der ein Ga-Face HEMT ist; [0027] Fig. 1b einen Schnitt durch einen Halbleitersensor gemäß der vorliegenden Erfindung gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform in schematischer Darstellung, der ein N-Face HEMT ist;

[0028] Fig. 2 eine schematische Schnittdarstellung eines Silizium ISFET gemäß dem Stand der Technik;

[0029] Fig. 3 ein Beispiel einer Messung, die mit dem erfindungsgemäßen Halbleitersensor an Aceton durchgeführt wurde;

[0030] Fig. 4 ein Beispiel einer Messung, die mit dem erfindungsgemäßen Sensor nacheinander an Propanol, Aceton und Methanol durchgeführt wurde;

[0031] Fig. 5 ein Beispiel einer Messung, die mit dem erfindungsgemäßen Sensor in Flüssigkeiten mit unterschiedlichem pH-Wert durchgeführt wurde;

[0032] Fig. 6a einen erfindungsgemäßen Halbleitersensor gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform, der ein Oberflächenwellen-Flüssigkeitssensor ist;

[0033] Fig. 6b einen Halbleitersensor gemäß einer anderen bevorzugten Ausführungsform, der ebenfalls ein Oberflächenwellen-Flüssigkeitssensor ist;

[0034] Fig. 7 einen erfindungsgemäßen Halbleitersensor mit einer funktionalen Schicht gemäß einer anderen bevorzugten Ausführungsform in einer schematischen Schnittdarstellung; und

[0035] Fig. 8 eine weitere Ausführungsform der Erfindung in schematischer Schnittdarstellung, wobei beide Polaritäten auf einem Sensor ausgebildet sind.

[0036] Fig. 1a zeigt einen ionensensitiven Halbleitersensor 10 mit einer so genannten Ga-Face-Struktur. Eine oben gelegene Schicht 1 aus GaN trägt an ihrer Oberfläche einen Source-Kontakt bzw. -Anschluss 2 und einen Drain-Anschluss 3, die voneinander beabstandet sind. Unterhalb der oberen GaN-Schicht 1 schließt sich direkt eine AlGaIn-Schicht 4 an. Unterhalb der AlGaIn-Schicht 4 und in direktem Kontakt dazu befindet sich wiederum eine GaN-Schicht 5, die eine untere GaN-Schicht bildet. D. h., die Source- und Drain-Anschlüsse 2 bzw. 3 sind auf einer Folge von Schichten 1, 4 und 5 angeordnet, die eine Heterostruktur aus Gruppe-III-Nitriden umfasst, die als HEMT-Struktur ausgebildet ist, d. h. als eine Struktur mit einer hohen Elektronenmobilität.

[0037] Zwischen der unteren GaN-Schicht 5 und der darüber liegenden AlGaIn-Schicht 4 befindet sich ein zweidimensionales Elektronengas 6, das durch Polarisationsseffekte an der Grenzfläche dieser beiden Schichten (4, 5) ausgebildet ist. Im Bereich des zweidimensionalen Elektronengases 6 besteht eine hohe Ladungsträgerkonzentration und eine hohe Ladungsträgerbeweglichkeit. Dadurch sind besonders hohe Kanalströme in dem Transistor realisierbar, die eine verbesserte Signalauswertung ermöglichen.

[0038] Die Flächenladungsdichte an der Grenzfläche zwischen der unteren GaN-Schicht 5 und der AlGaIn-Schicht 4 ist sehr hoch und beträgt beispielsweise bei einer Temperatur von 20°C bis zu  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . Die Beweglichkeit der Ladungsträger kann bei dieser Temperatur beispielsweise bis zu  $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  betragen. Da die Bewegung der Ladungsträger nur entlang der Grenzfläche und nicht senkrecht dazu möglich ist, spricht man von einem zweidimensionalen Elektronengas. Dieses zweidimensionale Elektronengas 6 befindet sich sehr nahe der Oberfläche der Struktur, z. B. in einem Abstand von weniger als 100 nm.

[0039] Die obere GaN-Schicht 1 dient zur besseren Kontaktierung des zweidimensionalen Elektronengases 6 und trägt die Source- und Drain-Kontakte 2 bzw. 3, die aus einer Schichtfolge verschiedener Metalle bestehen. Diese Metalle

sind beispielsweise Ti/Al, Ti/Au oder Ähnliches. Die nachfolgenden Schichten aus AlGaIn und GaN führen durch Polarisationsversprünge an der Grenzfläche zur Ausbildung des zweidimensionalen Elektronengases 6.

[0040] Unterhalb der unteren GaN-Schicht 5 befindet sich eine für die Ga-Face-Struktur notwendige Nukleations-schicht 7 aus AlN. Die gesamte Schichtfolge wird von einem Substrat 8 getragen, wobei für das Substrat 8 verschiedene Materialien, beispielsweise mit hexagonaler Wurzels-Struktur verwendet werden können, wie z. B. SiC, (111)-Si oder auch Saphir.

[0041] Der Halbleitersensor 10 mit seiner hier gezeigten Ga-Face-Struktur entspricht einem Feldeffekttransistor ohne metallisierter Gate-Fläche, d. h. die Fläche zwischen dem Source-Kontakt bzw. Anschluss 2 und dem Drain-Kontakt bzw. Anschluss 3 ist die blanke Halbleiteroberfläche und nicht eine MOS oder Shockley-Diode.

[0042] Das zweidimensionale Elektronengas 6 wird über den Source-Anschluss 2 und den Drain-Anschluss 3 kontaktiert und eine angelegte Spannung führt zu einem Kanalstrom, der durch Potentialveränderungen auf der Gate-Fläche beeinflusst werden kann. Diese Potentialveränderung auf der Gate-Fläche, die durch die Oberfläche der GaN-Schicht 1 gebildet ist, bewirkt den Sensoreffekt. D. h., durch Kontakt eines zu messenden Mediums, beispielsweise einer Flüssigkeit oder eines Gases, mit der Gate-Fläche bzw. mit der Oberfläche der oberen GaN-Schicht 1 wird eine Potentialveränderung bewirkt, welche die Ausgestaltung des zweidimensionalen Elektronengases 6 beeinflusst und somit einen veränderten Kanalstrom bzw. eine veränderte elektrische Leitfähigkeit der Schichtfolge bewirkt. Zur Messung des Stromes bzw. der elektrischen Leitfähigkeit der Schichtfolge, die das zweidimensionale Elektronengas 6 enthält, sind geeignete Mittel, beispielsweise in Form von Widerstandsmessgeräten oder Strom- bzw. Spannungsmessern, vorgesehen.

[0043] Die obere GaN-Schicht 1 dient insgesamt zur besseren Kontaktierung und kann, je nach den Erfordernissen des Einzelfalls, auch weggelassen werden. In diesem Fall wird die Gate-Fläche durch die AlGaIn-Schicht 4 gebildet.

[0044] Fig. 1b zeigt einen Halbleitersensor gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung, ebenfalls in einer schematischen Schnittdarstellung. Der Halbleitersensor 20 gemäß Fig. 1b ist als N-Face HEMT ausgebildet. Die oberste Schicht der Schichtfolge des Halbleitersensors 20, die den Source-Anschluss 2 und den Drain-Anschluss 3 trägt, wird in diesem Fall durch eine AlGaIn-Schicht 21 gebildet. Unter der oberen AlGaIn-Schicht 21 befindet sich eine GaN-Schicht 22 und darunter wiederum eine AlGaIn-Schicht 23, die eine untere AlGaIn-Schicht bildet. Unterhalb der unteren AlGaIn-Schicht 23 liegt eine weitere, untere GaN-Schicht 24. Die verschiedenen Schichten der Schichtfolge stehen in direktem Kontakt miteinander. Die Schichtfolge ist auf dem Substrat 8 aufgetragen.

[0045] Das Substrat 8 und die Source- und Drain-Anschlüsse 2 bzw. 3 sind, wie oben unter Bezugnahme auf Fig. 1a beschrieben, ausgestaltet.

[0046] Im Fall des N-Face HEMT gemäß Fig. 1b, der den Halbleitersensor 20 bildet, entsteht zwischen der unteren AlGaIn-Schicht 23 und der darüber liegenden GaN-Schicht 22, d. h. an der Grenzfläche zwischen diesen beiden Schichten, das zweidimensionale Elektronengas 6, das charakteristisch für die gezeigte Schichtfolge ist. Die oberste Schicht, d. h. die AlGaIn-Schicht 21 dient zur Kontaktierung des zweidimensionalen Elektronengases 6.

[0047] Die Schichtfolge GaN-AlGaIn-GaN führt zur Ausbildung des zweidimensionalen Elektronengases 6 an der Grenzfläche AlGaIn-GaN. Das unter der Schichtfolge lie-

gende Substrat 8 aus Saphir ist für epitaktisches Kristallwachstum verantwortlich. Der so realisierte HEMT bzw. High Electron Mobility Transistor kann somit als ionensensitiver Halbleitersensor bzw. als Gas- oder Flüssigkeitssensor verwendet werden. Die geschaffenen Strukturen können auch als MODFET bzw. Modulation Doped Field Effect Transistor bezeichnet werden.

[0048] Da das zweidimensionale Elektronengas 6 in den Fig. 1a und 1b sehr nahe an der Oberfläche der Struktur entsteht, führen Potentialveränderungen an der Grenzfläche zwischen dem zu messenden Medium, beispielsweise einem Fluid, und dem Halbleiter auch zu einer Veränderung der Polarisationsfelder, die für die Ladungsträgerkonzentration des zweidimensionalen Elektronengases 6 verantwortlich sind. Dieser Effekt ändert also die Leitfähigkeit des zweidimensionalen Elektronengases 6 und kann damit im Kanalstrom zwischen dem Source-Anschluss 2 und dem Drain-Anschluss 3 nachgewiesen werden. Während der Messung sind die Source- und Drain-Anschlüsse 2 bzw. 3 nicht der Flüssigkeit ausgesetzt, sondern über eine Dichtung, die in den Abbildungen nicht dargestellt ist, von der Gate-Fläche getrennt.

[0049] Fig. 3 zeigt eine Messung mit dem erfindungs-gemäßen Halbleitersensor, wobei der Kanalstrom, in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt ist. In dem hier gezeigten Beispiel wurde die Gate-Fläche in bestimmten zeitlichen Abständen mit Aceton in Verbindung gebracht. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das gemessene Signal gemäß Fig. 3 zeitlich in eine sehr schnelle und in eine langsamere Antwort des Sensors auf den Kontakt der Gate-Fläche mit einer Flüssigkeit, im vorliegenden Fall Aceton, einteilen lässt. Die schnelle Antwort erfolgt unmittelbar auf den Kontakt der Gate-Fläche mit dem Aceton, wobei der Kanalstrom schlagartig von ca. 38 mA auf ca. 12 mA absinkt, wobei hierfür weniger als 1 sec benötigt wird. Anschließend erfolgt eine weitere Absenkung auf ca. 10 mA in einem Zeitraum von ca. 100 sec.

[0050] Beim erneuten Kontakt mit Luft steigt der Kanalstrom von ca. 10 mA wiederum zunächst sehr steil bzw. schlagartig auf ca. 30 mA an und benötigt dann ca. weitere 200 sec um weiter auf einen Wert von ca. 38 mA anzusteigen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich eine sehr schnelle Antwort bzw. Fast Response im Bereich von weniger als 1 sec und anschließend eine langsamere Antwort bzw. Slow Response im Bereich von mehr als 100-200 sec einstellt.

[0051] Der Fast Response bzw. die schnelle Antwort kann dabei auf die schnelle Wechselwirkung zwischen den Dipolmomenten der Flüssigkeit und der polaren Oberfläche des Sensors zurückgeführt werden.

[0052] Besonders hoch ist die Änderung des Kanalstromes beim Benetzen einer zuvor mit Luft in Kontakt stehenden Gate-Fläche mit einer Flüssigkeit (relative Stromänderung  $\Delta I/I$  50%). Die Langzeitantwort beruht auf dem langsameren Ladungsaustausch der Ionen der Flüssigkeit mit der Halbleiteroberfläche.

[0053] Ein ähnliches Diagramm ist in Fig. 4 gezeigt, wobei ebenfalls der Kanalstrom in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt ist. Dabei wurden verschiedene Flüssigkeiten in Kontakt mit der Halbleiteroberfläche bzw. Gate-Fläche gebracht. Diese Flüssigkeiten waren nacheinander Propanol (a), Aceton (b) und Methanol (c). Auch hier ist die Unterteilung in schnelle und langsame Antwort des Sensors deutlich erkennbar. Je nach Polarität der Flüssigkeit ändert sich der Betrag des Kanalstromes.

[0054] Fig. 5 zeigt das Ergebnis der Messung von Flüssigkeiten verschiedener pH-Werte. Auch hier ist der Kanalstrom in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

[0055] Der Signalverlauf über einige Minuten ist dabei

charakteristisch für verschiedene Säurestärken. Beide Signalanteile spiegeln die Leitfähigkeitssänderung im zweidimensionalen Elektronengas 6 (siehe Fig. 1a und 1b) aufgrund der Wechselwirkung der Halbleiteroberfläche mit verschiedenen Flüssigkeiten wieder.

[0056] In der oben unter Bezugnahme auf die Fig. 1a und 1b beschriebenen Sensorstruktur besteht die sensitive Oberfläche zwischen dem Source-Anschluss 2 und dem Drain-Anschluss 3 aus einer GaN-Cap Layer bzw. GaN-Deckschicht, die bei der Messung direkt in Kontakt mit der zu messenden Flüssigkeit bzw. einem Medium steht. Die Wechselwirkung wird zwischen den Dipol-Momenten bzw. den Ionen in dem Medium und der polaren Oberfläche der bevorzugten Halbleiter-Heterostruktur GaN/AlGaIn hervorgerufen. Das Vorzeichen der Polarisation der Oberfläche kann je nach Anforderungen der zu untersuchenden Flüssigkeit durch die Wahl eines als Ga-Face (negativ) oder N-Face (positiv) prozessierten HEMT's ausgewählt werden.

[0057] Die Nukleationsschicht 7 in Fig. 1a dient hauptsächlich zum gezielten Wachstum von Ga-Face GaN. 20 Die Nukleationsschicht erhält man N-Face GaN.

[0058] Die Fig. 6a und 6b zeigen weitere bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung in schematischer, perspektivischer Darstellung.

[0059] Der in Fig. 6a gezeigte Halbleitersensor bzw. Flüssigkeitssensor 30 ist schichtweise aufgebaut, wie oben unter Bezugnahme auf die Fig. 1a beschrieben. Die einzelnen, übereinander liegenden Schichten sind mit den selben Bezugszeichen gekennzeichnet. Das zweidimensionale Elektronengas 6 befindet sich an der Grenzfläche zwischen der GaN-Schicht 5 und der darüber liegenden AlGaIn-Schicht 4. Der Halbleitersensor 30 hat auf seiner oben gelegenen Oberfläche 31 bzw. Oberseite eine Interdigital-Struktur 32, die mit einer Antenne 33 gekoppelt ist. In einem Abstand d von der Interdigital-Struktur 32 entfernt befindet sich eine weitere Interdigital-Struktur 34, die ebenfalls auf der Oberfläche 31 des Flüssigkeitssensors 30 angeordnet ist und zur Reflexion von Oberflächenwellen dient.

[0060] Im Betrieb wird ein von der Antenne 33 empfangener Funkpuls mittels der Interdigital-Struktur 32 über den piezoelektrischen Effekt in eine mechanische Oberflächenwelle verwandelt. Diese breitet sich über eine Laufstrecke, die durch den Abstand d gegeben ist, auf dem Sensor 30 aus und wird an der weiteren Interdigital-Struktur 34, die eine Elektrodenstruktur darstellt, reflektiert. Belastet man diese Elektroden mit unterschiedlichen Widerständen, wie sie bei dem oben beschriebenen Sensoreffekt auftreten, so trägt die reflektierte Oberflächenwelle die Signalinformation des Sensors in Form einer unterschiedlich stark gedämpften Welle. An der Interdigital-Struktur 32 bzw. dem mit der Antenne 33 gekoppelten Interdigital-Transducer wird diese mechanische Welle über den inversen piezoelektrischen Effekt in eine elektrische Spannung U umgewandelt, die über die Antenne 33 einen Funkpuls zum Empfänger zurücksendet.

[0061] D. h., die sensitive Gate-Fläche ist als resistive Last an der Interdigital-Struktur 34 angeschlossen. Der Widerstand dieser Last hängt von den Eigenschaften der Flüssigkeit auf der Gate-Fläche bzw. Oberfläche 31 ab. Es werden also die von der Interdigital-Struktur 32 erzeugten Oberflächenwellen an der Interdigital-Struktur 34 reflektiert, wobei der Reflexionsfaktor von der Last an der Interdigital-Struktur 34 abhängt und somit das reflektierte Signal die Informationen über die Flüssigkeit trägt.

[0062] Abb. 6b zeigt eine weitere mögliche Ausgestaltung eines Halbleiter- bzw. Flüssigkeitssensors 40, der ähnlich dem in Fig. 6a gezeigten Flüssigkeitssensor 30 aufgebaut ist, jedoch an seiner Oberfläche 31 eine zusätzliche

elektrisch leitende Schicht 41 trägt. Die Schichten und Elemente des Flüssigkeitssensors 40 sind mit den selben Bezugszeichen gekennzeichnet, wie sie auch bei Fig. 6a verwendet sind. Die elektrisch leitende Schicht 41 befindet sich zwischen der Interdigital-Struktur 32 und der weiteren Interdigital-Struktur 34. Die sensitive Gate-Fläche liegt auf der Laufstrecke der Oberflächenwelle zwischen der Interdigital-Struktur 32 und der Interdigital-Struktur 34. Die Dämpfung der Oberflächenwelle hängt unter anderem auch von der Leitfähigkeit der Gate-Fläche bzw. Oberfläche 31 ab. Die elektrisch leitende Schicht 41 dämpft die laufende Welle. Durch den Sensor-Effekt wird die Leitfähigkeit der Gate-Fläche verändert. Die bereits gedämpfte Welle wird dann an der Interdigital-Struktur 34 reflektiert, nochmals auf der Gate-Fläche gedämpft und erreicht dann die Interdigital-Struktur 32.

[0063] Das Messsignal wird also direkt auf der Lauflänge der Oberflächenwelle dazu verwendet, die mechanische Welle zu dämpfen. Wird nun durch den Sensoreffekt die Leitfähigkeit der Laufstrecke verändert, so führt dies auch zur Dämpfung der Welle, die von der Interdigital-Struktur 34 bzw. dem weiteren Interdigital-Transducer reflektiert wird und dann über die Antenne 33 abgestrahlt werden kann.

[0064] Beide in den Fig. 6a und 6b gezeigten Ausführungsformen des Sensors zeigen den Vorteil des hier beschriebenen Sensorkonzeptes. Es ist somit möglich, einen monolithischen, fernabfragbaren Sensor aufzubauen, der zur Detektion von Flüssigkeiten mit verschiedenen Dipol-Momenten oder pH-Werten dient. Die piezoelektrischen Gruppe-III-Nitride, insbesondere GaN und AlGaIn, ermöglichen die Signalverarbeitung mittels Oberflächenwellen, wie sie in den Fig. 6a und 6b dargestellt ist.

[0065] Fig. 7 zeigt noch eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Erfindung. Bei dem hier gezeigten Halbleitersensor 50 ist auf dem Substrat 8 eine Ga-Face oder N-Face-Heterostruktur angeordnet, wie sie oben ausführlich unter Bezugnahme auf die Fig. 1a und 1b beschrieben wurde. Im oberen Bereich der Struktur befindet sich das zweidimensionale Elektronengas 6. An der Oberfläche der Struktur befindet sich der Source-Anschluss 2 und der Drain-Anschluss 3. Zwischen Source und Drain ist an der Oberfläche eine funktionale Schicht 51 angeordnet. Die funktionale Schicht 51 auf der Gate-Fläche ist selektiv für unterschiedliche Ionen und dient somit zur besseren Unterscheidung zwischen verschiedenen Ionenarten. Weiterhin ist eine quantitative Bestimmung der Menge dieser Ionen möglich.

[0066] Die funktionale Schicht 51 kann z. B. aus Ionenaustauschern gefertigt sein, die für bestimmte Ionen, wie beispielsweise Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, usw. selektiv durchlässig sind. Als Ionenaustauscher dienen z. B. Ceolithe. Durch die selektive Durchlässigkeit treten nur bestimmte Ionen auf die Oberfläche der sensitiven Schichtfläche bzw. auf die GaN-Fläche, um dort den Sensoreffekt auszulösen.

[0067] Die funktionale Schicht 51 kann z. B. auch aus einer leitenden Keramik bestehen bzw. gefertigt sein, die für ionisierte Wasserstoffatome bzw. H<sup>+</sup> selektiv ist. Damit kann die Leitfähigkeit oder der pH-Wert von Flüssigkeiten besser bestimmt werden. Die leitende Keramik ist somit bevorzugt ein Protonenleiter, wie z. B. ORMOCER®. Je nach Wahl der Schichtfolge, d. h. als Ga-Face oder N-Face, kann zudem auch das Vorzeichen der Ladung der zu detektierenden Ionen festgestellt werden.

[0068] In Fig. 8 ist ein weiterer Sensor bzw. Halbleitersensor 60 gezeigt, der eine Kombination beider Schichtfolgen, d. h. sowohl Ga-Face als auch N-Face, in einem einzigen Sensor umfasst. D. h., es sind beide Polaritäten auf einem

einzigen Sensor vorhanden. Auf der Oberfläche der Heterostruktur sind randlich gelegen zwei Drain-Anschlüsse **61, 62** vorhanden, zwischen denen ein gemeinsamer Source-Anschluss **63** angeordnet ist. Das zweidimensionale Elektronengas **6** befindet sich, wie oben beschrieben, an einer Grenzfläche innerhalb der Heterostruktur.

[0069] Auf der in Fig. 8 linken Seite des Sensors ist eine N-Face-Struktur ausgebildet, während auf der rechten Seite eine Ga-Face-Struktur ausgebildet ist. Bei der Ga-Face-Struktur ist zwischen dem Substrat **8** und der Heterostruktur noch eine zusätzliche Nucleationsschicht **7** angeordnet. Die Herstellung dieses Sensors mit der Kombination beider Schichtfolgen erfolgt auf eine Weise, wie sie z. B. in dem Artikel "Lateral polarity heterostructures by overgrowth of patterned  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  nucleation layers", R. Dimitrov et. al., Mat. Res. Soc. Symp. Vol. 622, 2000 Materials Research Society, beschrieben ist.

[0070] Der Nachweis von Ionen kann auch auf Gase erweitert werden. Die durch verschiedene Arten von Strahlung (UV,  $\gamma$ , usw.) erzeugten ionisierten Gasmoleküle, im einfachsten Fall Luft, können ebenfalls über den beschriebenen Mechanismus detektiert werden.

[0071] Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Eigenschaften und Vorteilen bietet die vorliegende Erfindung eine Möglichkeit, Menge und Art von Ionen in Flüssigkeiten zu detektieren, d. h. es wird ein Dosimeter geschaffen. Die fernabfragbaren Komponenten besitzen auch bei den funktionalisierten Gate-Flächen erhalten. Durch die Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Halbleitersensors und durch die erfindungsgemäße Verwendung spezieller Feldeffekttransistoren wird ein Sensor zur Detektion von Flüssigkeiten mit verschiedener Polarität und mit verschiedenem pH-Wert geschaffen, der die Möglichkeit zur Fernabfrage bietet, unter rauen Bedingungen einsetzbar ist und bei der Herstellung einen reduzierten Aufwand bzw. eine weniger aufwendige Aufbau- und Verbindungstechnik erfordert.

#### Patentsprüche

1. Ionensensitiver Halbleitersensor, mit einer Folge von Schichten, die in Form eines Feldeffekttransistors ausgebildet sind, wobei jeweils mindestens ein Source-Anschluss (**2**) und ein Drain-Anschluss (**3**) des Feldeffekttransistors durch die Schichtfolge miteinander gekoppelt sind, und Mitteln zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit der Schichtfolge, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtfolge eine Heterostruktur (**1, 4, 5, 21, 22, 23**) aus Gruppe-III-Nitriden umfasst, die als HEMT-Struktur ausgebildet ist.
2. Ionensensitiver Halbleitersensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die oberste Schicht (**1; 21**) der Schichtfolge derart ausgestaltet ist, dass sie während der Messung in direkten Kontakt mit einem zu messenden Medium gerät.
3. Ionensensitiver Halbleitersensor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtfolge oder mindestens eine Schicht der Schichtfolge piezoelektrische Eigenschaften aufweist.
4. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen Oberflächenwellenfilter (**32, 34**) zum Auslesen eines Messsignals.
5. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Antenne (**33**) zur Übertragung eines Messsignals an eine Auswertestation und/oder zur drahtlosen Fern-

abfrage eines Messsignals.

6. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass an einer Grenzfläche zwischen zwei Schichten (**4, 5, 22, 23**) der Schichtfolge ein zweidimensionales Elektronengas (**6**) ausgebildet oder ausbildbar ist.

7. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtfolge ein oder mehrere GaN-Schichten (**1, 5, 22, 24**) und/oder ein oder mehrere AlGaN-Schichten (**4; 21, 23**) in wechselnder Folge umfasst.

8. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtfolge (**1, 4, 5, 21, 22, 23**) AlGaN umfasst und/oder aus quaternären Verbindungen der Gruppe-III-Nitride hergestellt ist.

9. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die oberste Schicht (**1; 21**) als GaN-Schicht oder als AlGaN-Schicht ausgebildet ist.

10. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch ein Substrat (**8**), auf dem die Schichtfolge aufgebracht ist, wobei das Substrat (**8**) bevorzugt aus Saphir, SiC oder (III)-Si gefertigt ist.

11. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Source- und Drain-Anschlüsse (**2, 3**) Schichten oder Schichtfolgen von Metallen umfassen, bevorzugt Ti/Al und/oder Ti/Au.

12. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Schichtfolge als HEMT-Struktur und/oder MODFET-Struktur ausgestaltet ist.

13. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Nukleationsschicht (**7**), die die Schichtfolge (**1, 4, 5**) von dem darunterliegenden Substrat (**8**) trennt.

14. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Dichtung zur Trennung der Kontakte (**2, 3**) von dem zu messenden Medium.

15. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er monolithisch aufgebaut ist.

16. Ionensensitiver Halbleitersensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine auf der Gate-Fläche (**31**) des Feldeffekttransistors angeordnete funktionale Schicht (**51**) zur Unterscheidung verschiedener Ionenarten und/oder zur quantitativen Bestimmung von Ionen.

17. Ionensensitiver Halbleitersensor nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die funktionale Schicht (**51**) aus Ionentauschern, insbesondere Zeolithen, gefertigt ist, die nur für bestimmte Ionen selektiv durchlässig sind, und/oder aus einer leitenden Keramik gefertigt ist, die für ionisierte Wasserstoffatome selektiv ist.

FIG.1a

10

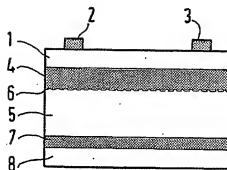


FIG.1b

20

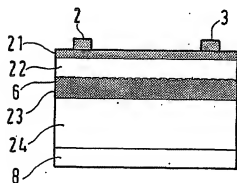
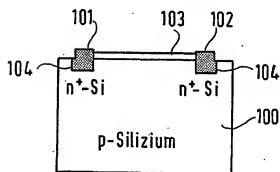


FIG.2





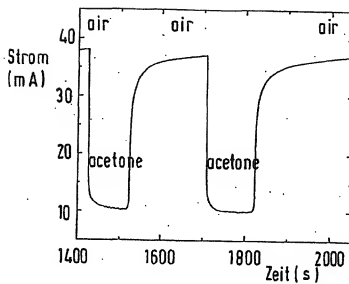


FIG. 3

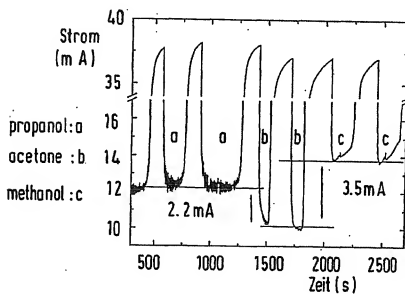


FIG. 4

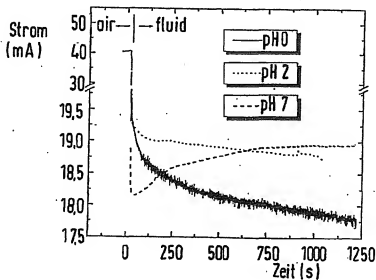


FIG. 5

FIG. 6a

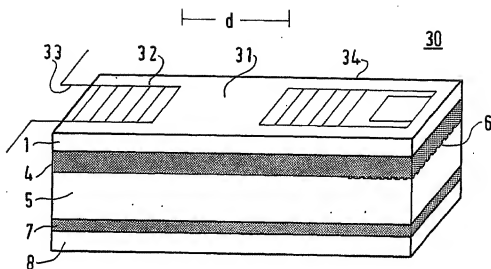


FIG. 6b

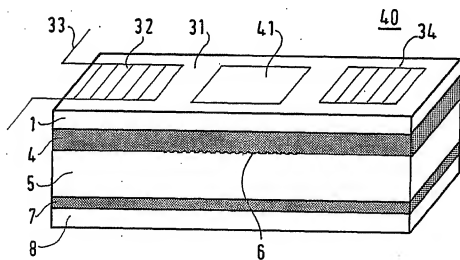


FIG. 7

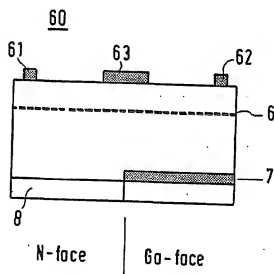
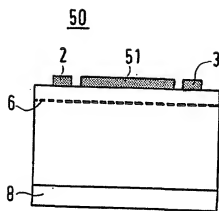


FIG. 8